

# Avaliação hidrogeológica de aquíferos costeiros em áreas de bacias de infiltração no sul do Brasil

*Hydrogeological assessment of coastal aquifers in areas of infiltration basins in southern Brazil*

Gabriela Berwanger<sup>1</sup>; Pedro Antônio Roehe Reginato<sup>2</sup>; Antonio Pedro Vieiro<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul - Brasil, g.berwanger@hotmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul - Brasil, pedro.reginato@ufrgs.br

<sup>3</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul - Brasil, antonio.vieiro@ufrgs.br

## Recebido:

19 de maio de 2024

## Recebido no formato de revisão:

13 de março de 2025

## Aceito:

13 de março de 2025

## Disponível online:

07 de maio de 2025

## Seção:

Artigos

## Palavras-chave:

Aquíferos costeiros.  
Bacias de infiltração.  
Avaliação hidrogeológica.

## Keywords:

Coastal aquifers.  
Infiltration basins.  
Hydrogeological assessment.

## RESUMO

Este trabalho realizou uma avaliação hidrogeológica em duas áreas de bacias de infiltração de esgoto no Litoral Norte do Rio Grande do Sul. Foram geradas análises gráficas e estatísticas, compiladas em Modelos Hidrogeológicos Conceituais a fim de comparar ambas as áreas. Observou-se a contaminação por E. Coli, Nitrato, SDT e Sulfato de acordo com a Resolução CONAMA nº 396/2008 e Resolução CONAMA nº 420/2009, com alteração de Classe de águas subterrâneas para E. Coli, Nitrato e SDT. Conclui-se que espessura da zona vadosa inferior a 1,5 metros, baixo gradiente hidráulico, baixa velocidade de fluxo de águas subterrâneas, alta permeabilidade da solo e pequena profundidade do lençol freático propiciam cenários de contaminação das águas subterrâneas com bacias de infiltração de esgoto.

## ABSTRACT

This study conducted a hydrogeological assessment in two areas with sewage infiltration basins in the Northern Coast of Rio Grande do Sul. Graphical and statistical analyses were performed and compiled into Conceptual Hydrogeological Models to compare both areas. Contamination by E. Coli, Nitrate, SDT, and Sulfate was observed in accordance with CONAMA Resolution No. 396/2008, resulting in a change in groundwater classification for E. Coli, Nitrate, and SDT. It is concluded that factors such as vadose zone thickness less than 1.5 meters, low hydraulic gradient, slow groundwater flow velocity, high soil permeability, and shallow groundwater depth create scenarios for groundwater contamination in areas with sewage infiltration basins.

<https://doi.org/10.14295/ras.v39i1.30276>



## 1. INTRODUÇÃO

A zona costeira brasileira é extensa e variada, estendendo-se por cerca de 8.698 km com largura variável, abrangendo 17 estados do país e mais de quatrocentos municípios, sendo de extrema importância econômica para o Brasil. A zona costeira concentra quase um quarto da população do país, abrigada em cerca de 400 municípios, com uma densidade média de 87 habitantes/km<sup>2</sup>, cinco vezes maior do que a média nacional (17 habitantes/km<sup>2</sup>) (MMA, 2022).

No estado do Rio Grande do Sul, a zona costeira é representada pela Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS), que abrange 32 municípios. Os depósitos sedimentares do Pleistoceno e Holoceno refletem o cenário marcado pela recorrência de períodos de elevação e queda do nível do mar (Villwock & Tomazelli, 1995), juntamente com dinâmicas climáticas e costeiras.

De acordo com Moraes (1995), a ocupação populacional da zona costeira no Brasil é um processo recente e contínuo, sendo um evento espontâneo e caótico, exigindo grande esforço em ações corretivas para evitar problemas no planejamento urbano. Na PCRS, especialmente na região do Litoral Norte, a urbanização já é intensa e os problemas de planejamento urbano tendem a se agravar com o crescimento acelerado da população. Em termos de saneamento, a necessidade de tratamento dos efluentes da população de maneira econômica e eficiente, o que pode ser um desafio.

Uma alternativa para o tratamento de efluentes aplicada no Litoral Norte é a infiltração rápida em bacias de infiltração. A tecnologia, por meio de condições hidrogeológicas e físicas favoráveis que promovem reações bioquímicas, pode remover poluentes como nitrogênio, fósforo e microrganismos patogênicos do efluente (Hespanhol, 2002; Asano et al., 2007). Embora a bibliografia traga resultados eficientes para as bacias de infiltração (Braga, 1998; Zanatta, 2011; Silva, 2016), o acompanhamento e monitoramento da técnica de tratamento de efluentes são essenciais, uma vez que há um aumento contínuo na população, o que implica em mais efluentes nas estações de tratamento e a necessidade de manutenção frequente dessa tecnologia. Além disso, a escolha estratégica e apropriada do local para as bacias de infiltração é crucial, uma vez que, para a eficiência da tecnologia, características como uma zona vadosa de 1,5 metros, inclinação adequada e áreas dimensionadas para a quantidade de efluente aplicado (2-25 hectares para 3.785 m<sup>3</sup>/dia, de acordo com Crites et al., 1998) devem ser respeitadas.

Este trabalho realizou a avaliação hidrogeológica e hidroquímica do Sistema Aquífero Costeiro do Rio Grande do Sul em áreas onde foram implantadas bacias de infiltração de esgoto, contribuindo para uma melhor compreensão das respostas hidrogeológicas e hidroquímicas provenientes desses sistemas de tratamento e do sistema aquífero correspondente.

O trabalho foi realizado em conjunto com o Projeto de Pesquisa desenvolvido pelo IGEO/IPH, intitulado "Estudos de Viabilidade Técnica para Disposição de Efluentes Sanitários em Solo na Região do Litoral Norte". Devido à solicitação do cliente, os mapas e os nomes das áreas de estudo foram omitidos por questões de confidencialidade contratual.

## 2. ÁREAS DE ESTUDO

As áreas de bacias de infiltração escolhidas para essa pesquisa estão localizadas em dois municípios do Litoral Norte do Rio Grande do Sul (Figura 1).

As duas áreas são apresentadas na Figura 2.

A área de estudo 1 é composto por dezesseis bacias de infiltração operacionais e ocupando uma área de 37 hectares. A área de estudo 2 engloba três bacias de infiltração operacional interligadas: duas bacias de infiltração rápida, totalizando uma área de 0,46 hectares, e uma bacia de apoio operacional, com área de 0,16 hectares. A área total do sistema 2 é da ordem de 1 hectare. A profundidade das bacias gira em torno de 2 metros, recebendo quase exclusivamente esgoto bruto.

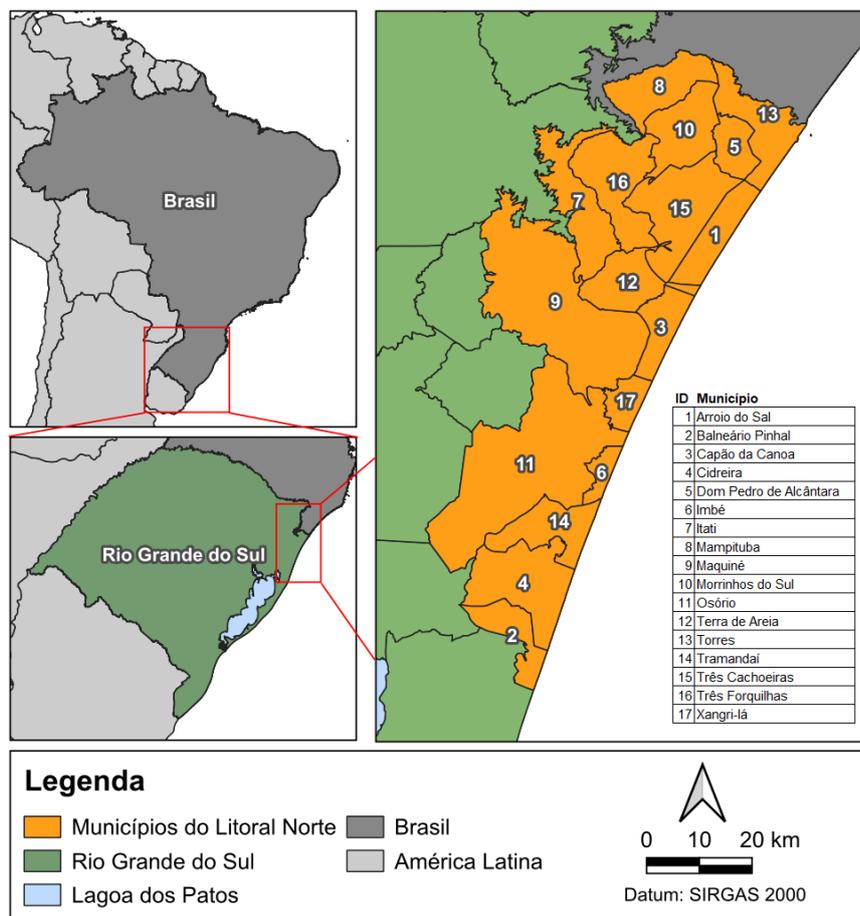


Figura 1. Mapa de localização da região dos municípios do Litoral Norte no Rio Grande do Sul.

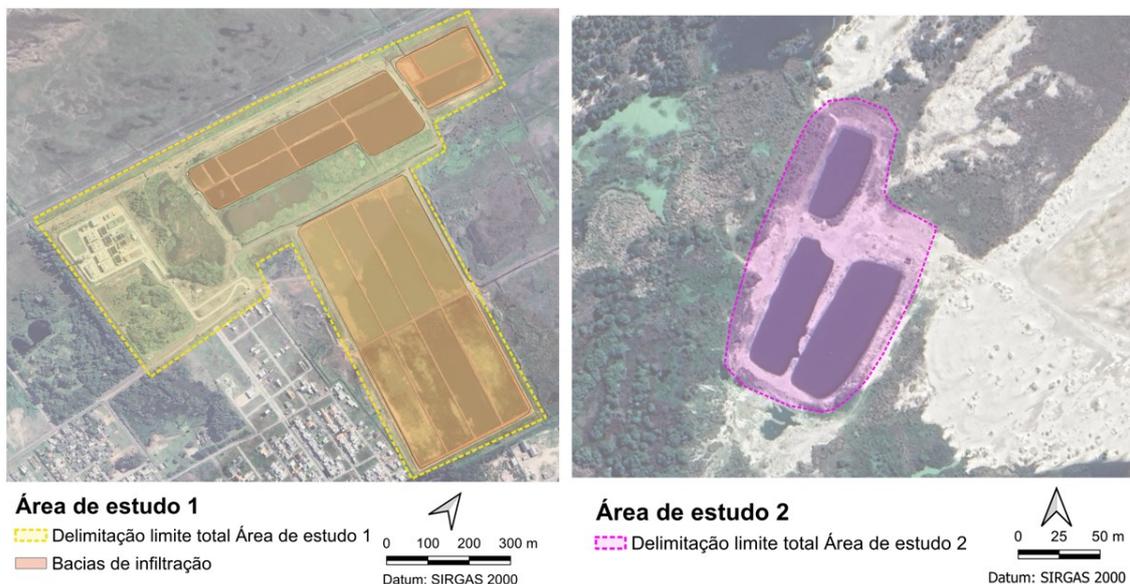


Figura 2. Área de estudo 1 e 2, respectivamente. A área de estudo 1 é situada de forma mais próxima à população urbana, enquanto a área de estudo 2 é cercada por dunas, estando mais distante de civilização. As áreas estão situadas no Litoral Norte do Rio Grande do Sul.

Ambas as áreas de estudo são caracterizadas por uma sazonalidade populacional atenuada no verão. O clima em ambas as regiões é temperado úmido (Cfa) segundo a classificação de Köppen. O clima Cfa é caracterizado por temperaturas médias no mês mais quente, que ultrapassam os 22°C, e por temperaturas no mês mais frio entre -3°C e 18°C (Hasenack e Ferraro, 1989).

As áreas estão situadas na porção litorânea do estado, o qual é denominada de Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS). A região é englobada pela bacia sedimentar de Pelotas e que, por sua vez, desenvolveu-se sobre o embasamento cristalino pré-cambriano pertencentes ao Escudo Uruguaio-Sul-Riograndense e ao Escudo Catarinense e sequências sedimentares e vulcânicas, paleozóicas e mesozóicas, da Bacia do Paraná (Tomazelli e Villwock, 2000). A área específica dentro da PCRS a qual as áreas se concentram é denominada de Litoral Norte.

A região pertence ao Sistema Laguna-Barreira IV, que é o mais recente sistema deposicional do tipo laguna-barreira da PCRS, sendo constituída essencialmente por areias quartzosas finas ou muito finas e, por vezes, com elevadas concentrações de minerais pesados (Villwock e Tomazelli, 1995).

Em relação à hidrogeologia do local, na região da PCRS ocorre, conforme Machado e Freitas (2005), o Sistema Aquífero Quaternário Costeiro (SAQC), hoje denominado por Troian (2020) como Sistema Aquífero Costeiro (SAC).

O SAC é caracterizado por unidades hidroestratigráficas associados com camadas de maior porosidade e permeabilidade que formam grandes pacotes de sedimentos (espessuras entre 250 e 300 m, chegando em alguns pontos com até 490 m) depositado durante o Cenozoico (Troian, 2020). Conforme Lisboa (2004), o aquífero apresenta uma elevada heterogeneidade vertical e horizontal, principalmente visto que há presença de sedimentos arenosos (areia grossa, média, fina e muito fina), intercaladas com camadas de sedimentos finos (argilas e siltes) formados em diferentes ambientes de sedimentação (marinho, eólico, praiado e lagunar) (Troian, 2020), apresentando, portanto, condições livres, semi-confinadas a confinadas, com considerável potencial.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O levantamento de dados sobre as áreas de estudo foi realizado a partir de duas fontes principais: o responsável pelo empreendimento, que forneceu dados históricos coletados ao longo da vigência das licenças ambientais, e o Projeto de Pesquisa do IGEO/IPH, que disponibilizou informações geológicas e hidrogeológicas. Este último incluiu dados obtidos com novos poços e piezômetros, testes de condutividade hidráulica (Slug Test), porosidade total e efetiva (a partir de amostras indeformadas analisadas em laboratório), nível de água (medido manualmente e com sensores automáticos) e dados hidroquímicos coletados em campanhas mensais.

#### 3.1. Dados geológicos

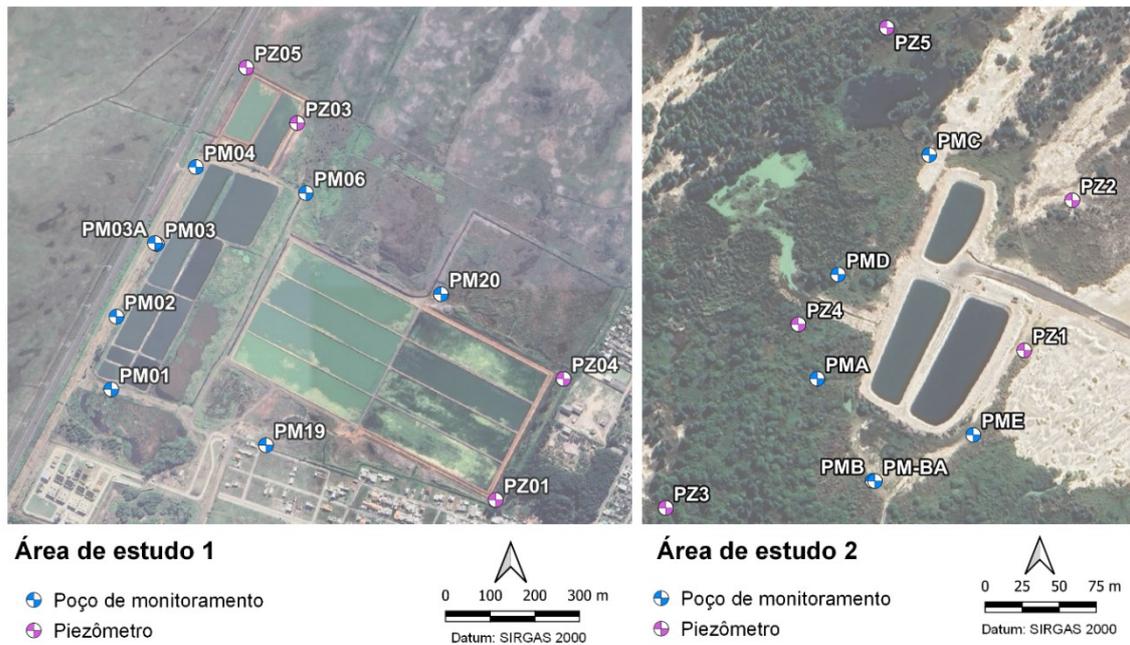
Dados litológicos foram utilizados para avaliar a ocorrência de diferentes camadas de sedimentos que ocorrem em profundidade. Os dados foram obtidos por meio de relatórios construtivos dos poços de monitoramento disponibilizados pelo Projeto de Pesquisa do IGEO/IPH. Além disso, dados de sondagens geológicas foram utilizados para caracterizar os perfis geológicos. Para a Área de Estudo 1 foram perfurados dois pontos: um foi realizado próximo às bacias de infiltração, com o objetivo de caracterizar a geologia até uma profundidade de 20 metros no local onde deveria ocorrer a infiltração de efluentes, e o outro foi realizado em um ponto mais distante. Na Área de Estudo 2 também foram realizadas duas sondagens seguindo a mesma estratégia.

#### 3.2. Gestão de dados de nível de água

Para avaliar as variações naturais dos níveis de água, bem como a profundidade do lençol freático, foram avaliados os dados de nível de água coletados durante as campanhas de amostragem de águas subterrâneas (medições mensais, feitas com medidor manual de nível de água) coletadas nos sete poços de monitoramento e quatro piezômetros para a Área 1 e nos cinco poços de monitoramento e cinco piezômetros para a Área 2 (Figura 3). Com os dados de nível de água foram realizadas avaliações e análises estatísticas dos dados a fim de identificar oscilações nos níveis estáticos e sua proximidade com a superfície e base das lagoas de infiltração.

#### 3.3. Gestão de dados hidroquímicos

Para a Área de Estudo 1, as coletas de água subterrânea ocorreram mensalmente durante um ano em 7 (sete) poços de monitoramento, sendo 1 (um) considerado amostra branca. Para a Área de Estudo 2, as coletas foram realizadas mensalmente, ao longo de um ano, nos 5 (cinco) poços de monitoramento, sem poço branco para amostras.



**Figura 3.** Poços de monitoramento e piezômetros das áreas de estudo 1 e 2, respectivamente.

As amostras foram devidamente condicionadas e enviadas a um laboratório para análise (Eurofins®).

Os parâmetros avaliados foram Nitrato, Nitrito, Nitrogênio Kjeldahl Total, Nitrogênio Amoniacoal, E. Coli, SDT, Cloretos, Sulfatos, Fósforo Total, Fosfatos, pH, Eh e Condutividade Elétrica (CE). Por fim, avaliou-se se os valores detectados estão dentro dos padrões enquadrados pela legislação aplicável e vigente para águas subterrâneas no Brasil (Resolução CONAMA nº 396/2008 e Resolução CONAMA nº 420/2009 para Nitrato), considerando o valor máximo permitido (MVP) as diferentes classes de qualidade das águas subterrâneas.

### 3.4. Comportamento das águas subterrâneas

A vazão das águas subterrâneas será avaliada com base na geração de mapas de vazão, considerando a carga hidráulica. Os mapas serão gerados em QGIS utilizando o interpolador *Inverse Distance Weighting*.

Por fim, serão calculados os gradientes hidráulicos entre os poços e estimadas as velocidades aparente ( $V_q$ ) e intersticial ( $V_i$ ) das águas subterrâneas com base nas equações

$$V_q = K \times \frac{\Delta h}{L}, \quad (1)$$

onde:  $K$  é a condutividade hidráulica e  $\Delta h/L$  é a carga hidráulica.

$$V_i = \frac{K \times \frac{\Delta h}{L}}{\eta_e}, \quad (2)$$

onde:  $\eta_e$  é a porosidade efetiva.

### 3.5. Modelo Hidrogeológico Conceitual

O Modelo Hidrogeológico Conceitual (MHC) foi elaborado com base na Diretriz Técnica FEPAM nº 04/2021, utilizando dados de campo coletados pelo Grupo de Pesquisa, além de referências bibliográficas para informações não coletadas em campo. O modelo foi montado com base em dados plotados no QGIS e posteriormente manipulados no Adobe Photoshop CS6, 2012.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Análise hidrogeológica

#### 4.1.1. Área 1

A Área 1 foi caracterizada como granular, não confinada e heterogênea. Com base nos dados de sondagens do Projeto de Pesquisa, a região foi caracterizada pela interceptação de sedimentos arenosos, contendo sedimentos mais finos e compactados a partir de 14 metros de profundidade, onde se encontra uma camada de areia silto-argilosa, que foi definida como limite basal da camada aquífera não confinada.

A determinação da porosidade total e efetiva foi realizada através de duas amostras indeformadas, coletadas na área de estudo pelo Projeto de Pesquisa. A amplitude da porosidade efetiva variou consideravelmente entre 23,81% e 33,08%, enquanto a porosidade total apresentou variações mais moderadas, variando entre 35% e 36,83%.

Os resultados de condutividade hidráulica gerada através de Slug Test para a Área 1 trouxeram o valor médio calculado de  $3,7 \times 10^{-5}$  m/s.

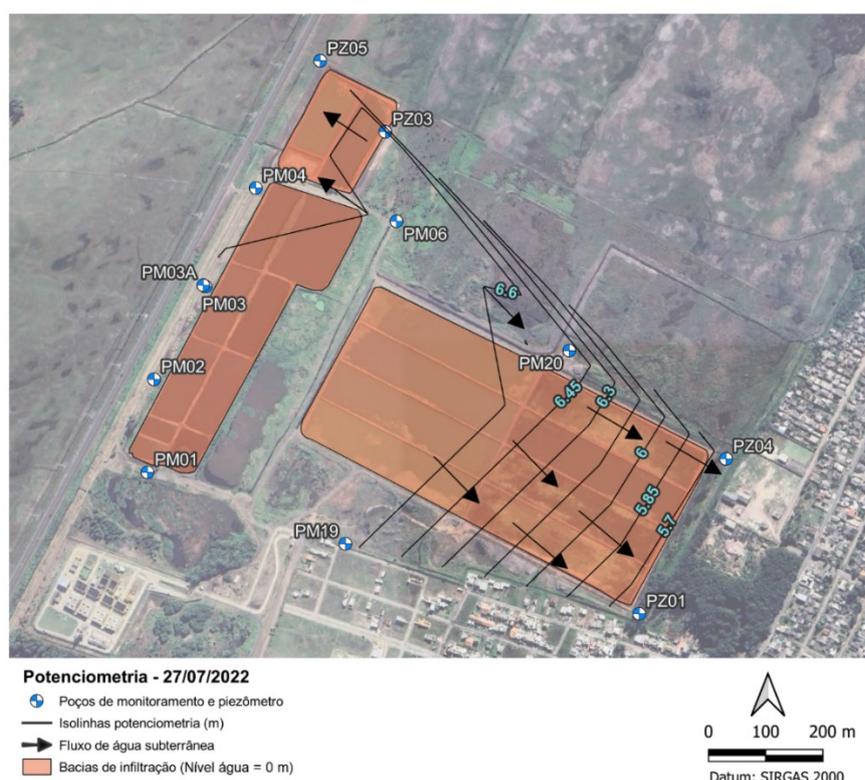
Na análise do nível d'água verificou-se que a profundidade média do nível d'água situou-se entre 0,53 e 1,35m nos poços de monitoramento e entre 1,13 e 2,18m nos piezômetros. Ressalta-se que as profundidades dos níveis de água, com exceção do piezômetro PZ05, ficaram próximas à superfície e base das bacias de infiltração. Essa discrepância na profundidade do nível da água observada nos poços de monitoramento e nos piezômetros pode ser atribuída à localização desses pontos em relação às bacias de infiltração. Assim, os poços de monitoramento, localizados mais próximos das bacias, apresentaram níveis de água mais rasos em comparação aos piezômetros. Notavelmente, o piezômetro PZ05 apresentou os níveis de água mais profundos entre os pontos de monitoramento.

**Tabela 1** – Análises estatísticas dos níveis de água dos poços de monitoramento e piezômetros da Área 1

Análise estatística	Profundidade do nível de água (m)											
	PM01	PM02	PM03	PM03A	PM04	PM06	PM19	PM20	PZ01	PZ03	PZ04	PZ05
Média	1,35	1,27	1,35	1,22	0,82	1,00	0,53	1,22	1,35	1,13	1,38	2,18
Mediana	1,36	1,27	1,35	1,21	0,82	1,01	0,49	1,20	1,34	1,10	1,43	2,16
Desvio Padrão	0,12	0,13	0,11	0,06	0,11	0,06	0,07	0,07	0,13	0,11	0,19	0,13
Máximo	1,53	1,50	1,53	1,34	0,94	1,08	0,63	1,34	1,61	1,34	1,72	2,45
Mínimo	1,05	1,00	1,13	1,13	0,58	0,88	0,40	1,13	1,18	1,04	1,15	2,04
Variância	0,014	0,016	0,012	0,004	0,012	0,004	0,005	0,005	0,016	0,011	0,035	0,017
Nº de amostras	12	12	12	11	8	12	11	11	10	8	8	8

Em resumo, a análise das cotas do nível d'água mostrou que os níveis d'água são inferiores a 1,5m para os poços de monitoramento, apresentando valores de profundidade máxima de 1,53m, e nível máximo de profundidade de 2,45m para o piezômetro. Isto representa uma profundidade rasa dos níveis de água para uma área de bacias de infiltração.

O fluxo de água subterrânea foi avaliado gerando um mapa de carga hidráulica referente às maiores cotas detectadas no banco de dados (Figura 4). As isolinhas potenciométricas possuem espaçamento de 0,05 m. O fluxo de água tem direção sudeste e noroeste. O ponto de recarga está concentrado no meio do sistema de esgotamento sanitário, sendo os principais poços PM19 e PM20. O percurso da água vai do centro da área da bacia de infiltração até as bordas da área. Ressalta-se que os poços mais próximos às bacias de infiltração, especialmente PM01, PM02, PM03, PM04 e PM06, são influenciados por elas, apresentando níveis superiores aos da condição natural. Os mapas gerados não consideraram lagoas de infiltração como áreas de recarga. Com a presença de lagoas e a ocorrência de processos de infiltração, os mapas teriam um formato diferente, pois as lagoas influenciam nas cargas hidráulicas.



**Figura 4.** Mapa potenciométrico para a Área 1 no dia de maior cota de água subterrânea.

#### 4.1.2. Área 2

Para a Área 2, além de possuir a mesma caracterização da Área 1 – granular, não confinada e heterogênea –, foi avaliada uma camada de areia fina de ambiente eólico, uma camada de areia fina depositada em ambiente de margem lagunar e uma camada arenosa-siltosa caracterizada por areia fina com 36% de silte. Esta camada representa um ambiente de fundo lagunar e devido à presença de sedimentos mais finos (silte) foi considerada a base da unidade aquífera.

A porosidade total variou entre 38,72 e 39,58%, enquanto a porosidade efetiva apresentou valores entre 35,46 e 37,37%.

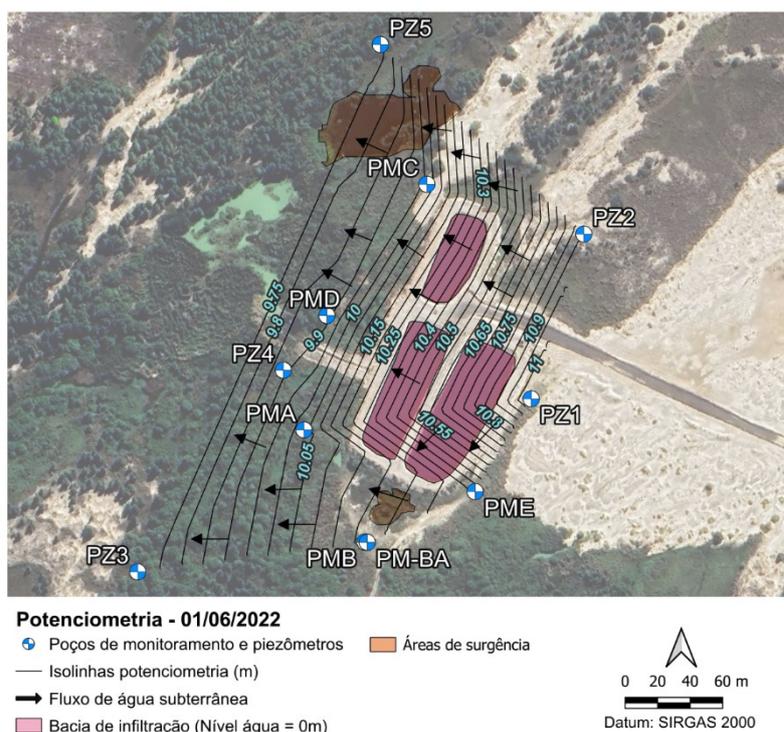
Os valores encontrados para a condutividade hidráulica trouxeram o valor médio calculado de  $6,35 \times 10^{-5}$  m/s para o aquífero.

Em relação ao nível de água subterrânea dos pontos de monitoramento da Área 2 (), verificou-se que as menores profundidades apresentaram resultados de 0,36 m (PMBA e PME), enquanto as maiores profundidades do nível d'água foram observadas em 1,26 m (PMBA). Em relação aos piezômetros, foi observada a saturação nos pontos PZ03, PZ04 e PZ05 (0m de profundidade) e a maior profundidade detectada foi de 2,18m no PZ05. Assim como para a Área 1, as profundidades rasas observadas na Área 2 demonstram um lençol freático próximo à superfície das bacias de infiltração, o que pode impactar negativamente a capacidade de infiltração no solo.

O mapa piezométrico da Área 2 (Figura 4) foi gerado considerando a data onde foi observada a maior cota de água subterrânea (01/06/2022). As isolinhas de potenciometria possuem distanciamento de 0,03m. Ainda, assim como a Área 1, foram tracejadas as bacias de infiltração da área de estudo, porém não foram consideradas para realização da potenciometria. É possível observar que o fluxo da água apresenta sentido noroeste-oeste-sudoeste, sendo a variação entre os gradientes baixa. Conforme demonstram os mapas, compreende-se a saturação dos piezômetros PZ03, PZ04 e PZ05 que, apesar de estarem situados mais distantes das bacias, estão localizados em pontos de direcionamento de fluxo. Por fim, o fluxo vai de acordo com áreas de surgência que foram observadas em campo, destacadas na Figura 4.

**Tabela 2** – Análises estatísticas dos níveis de água dos poços de monitoramento e piezômetros da Área 2

Análise estatística	Profundidade do nível de água (m)									
	PMA	PMBA	PMC	PMD	PME	PZ01	PZ02	PZ03	PZ04	PZ05
Média	0,65	0,81	0,65	0,60	0,76	0,66	0,98	0,00	0,00	0,00
Mediana	0,65	0,83	0,65	0,62	0,73	0,90	1,15	0,00	0,00	0,00
Desvio Padrão	0,14	0,29	0,16	0,10	0,29	0,46	0,36	0,00	0,00	0,00
Máximo	0,87	1,26	0,90	0,77	1,23	1,05	1,30	0,00	0,00	0,00
Mínimo	0,44	0,36	0,42	0,40	0,36	0,00	0,45	0,00	0,00	0,00
Variância	0,02	0,09	0,03	0,01	0,08	0,21	0,13	0,00	0,00	0,00
Nº de amostras	12	11	12	12	11	7	7	7	7	7

**Figura 5.** Mapa potenciométrico para a Área 2 no dia de maior cota de água subterrânea.

As velocidades (aparente e intersticial) das águas subterrâneas foram calculadas a partir dos valores de condutividade hidráulica média dos poços medidos no Slug Test ( $6,35 \times 10^{-5}$  m/s), maior porosidade efetiva (37,37%) e gradiente hidráulico – o gradiente de 0,00793 foi encontrado. O valor de  $V_q$  calculado foi de  $5,05 \times 10^{-7}$  m/s (4,35 cm/dia), enquanto  $V_i$  resultou em  $1,34 \times 10^{-6}$  m/s (11,64 cm/dia). Os valores indicam baixas velocidades das águas subterrâneas, justificadas pelos baixos valores do gradiente hidráulico.

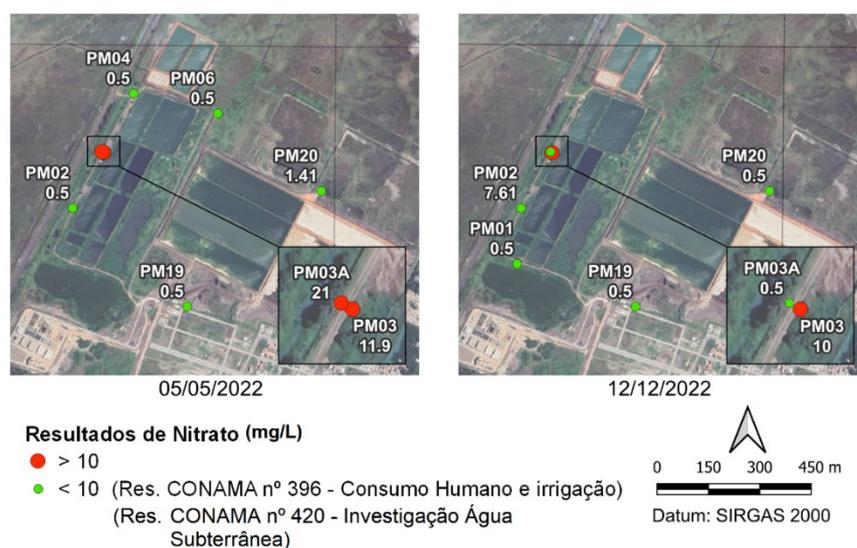
## 4.2. Análise hidroquímica e avaliação de processos de contaminação

### 4.2.1. Área 1

Aquém de apresentar os resultados da análise hidroquímica, é importante ressaltar que, ao longo dos processos de amostragem e visita a campo, o grupo do Projeto de Pesquisa identificou que a rede de canais que circunda as bacias de infiltração estava captando o efluente das próprias bacias, pois a rede acaba funcionando como dreno. Assim, o efluente que infiltra pelas bacias, devido à elevação do lençol freático, acaba sendo direcionado para esses canais, que possuem nível estático mais baixo. Por fim, os poços de monitoramento próximos a esses canais também podem ter alguma influência nos resultados.

O nitrato foi detectado com valor superior ao respectivo MVP nos poços PM03 (11,9 mg/L), PM03A (21 mg/L) e no poço PM03 (10 mg/L), respectivamente. Em visita à área, foi observado que o PM03 apresenta problema de inclinação da laje de proteção sanitária, que deve ter sido causado por algum dano ocorrido no passado, como, por exemplo, uma máquina que pode ter atingido a estrutura da laje, provocando a inclinação.

Devido a esta inclinação, é provável que as tubulações de proteção sanitária tenham rompido, favorecendo processos de infiltração. Além disso, o poço está localizado próximo ao canal que margeava a bacia de infiltração e que continha efluentes. Este fato poderia favorecer a infiltração neste poço. Como o PM03A está próximo do PM03, é possível que tenha influência no resultado devido a este problema. Por fim, é possível observar que em nenhum outro momento para o poço PM03 há detecção de valores elevados. Ainda assim, outro poço que apresentou valor de alerta foi o PM02, próximo ao PM03 e PM03A, com valor de 7,61 mg/L N de Nitrato. O mapa de concentrações pode ser observado na Figura 5, demonstrando a tendência de valores mais elevados na região dos poços PM03 e PM03A. Assim, é possível concluir que as águas estão classificadas na Classe 3 da Resolução CONAMA nº 396/2008 em 4% dos resultados, sendo os 96% restantes das amostras classificadas como Classe 1.



**Figura 6.** Datas e concentrações de Nitrato acima do MVP na Área de estudo 1.

Para os demais compostos nitrogenados, temos que, para o Nitrito, todos os resultados ficaram abaixo do limite de detecção. Como a detecção do Nitrogênio Kjeldahl Total (TKN) representa a amônia livre ( $\text{NH}_3$ ) detectada adicionada ao nitrogênio orgânico, ambos os parâmetros serão analisados em conjunto. A amônia é indicativa de aporte mais recente de nitrogênio, pois, no ciclo do nitrogênio, é a primeira forma de oxidação. As maiores concentrações foram em PM03. Considerando o ciclo do nitrogênio, espera-se que os resultados das formas reduzidas ( $\text{NH}_3$ ) estejam mais próximos das bacias de infiltração e a forma oxidada esteja em locais mais distantes ( $\text{NO}_3$ ). Porém, os valores de compostos nitrogenados concentraram-se nos poços PM03 e PM03A, o que pode indicar tanto infiltração proveniente da bacia quanto mais um indício do problema de talude da laje de proteção sanitária do poço PM03.

Para E. Coli, a frequência de não cumprimento do MVP foi de 24 vezes, ocorrendo principalmente nos poços PM02 (6 vezes) e PM03 (6 vezes). Portanto, os resultados definem que as águas subterrâneas estão incluídas na Classe 4 da Resolução CONAMA nº 396/2008 em 33,78% dos resultados, sendo os 66,21% restantes das amostras, classificados como Classe 1.

O pH é inferior a 6,0 na maioria das coleções em todos os poços. Valores baixos de pH não podem ser associados a bacias de infiltração, pois os efluentes possuem pH alcalino (>7). Esta é uma característica do aquífero local, que registra valores abaixo de 5, conforme observado no poço PM19, que é o poço branco. O MVP da Resolução CONAMA nº 396/2008 está na faixa de 6 a 9. Foram 62 resultados que não atenderam à Resolução, o que representa 84% das amostras. É possível observar que, quanto mais próximo das bacias (poços PM01, PM02, PM03, PM03A, PM04), mais alcalino é o pH.

Os maiores resultados de CE foram todos detectados no PM01, que teve uma faixa de 1.054 a 2.176  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , com a maior média no poço PM01 (1.391,2  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). O poço PM1 fica próximo às bacias e também está localizado em áreas onde já foram observados surtos de água na base da bacia, o que pode estar comprometendo a qualidade da água do poço.

A análise de Eh permite observar que a região mais próxima das bacias (PM01, PM02, PM03, PM03A e PM04) apresentam condições oxidantes ( $Eh > 0$ ). Por outro lado, a região noroeste (PM19 e PM20) apresenta condições redutoras, além de possuir pH mais ácido. Estas condições são importantes para a análise de compostos nitrogenados na região. Porém, para uma análise completa, é necessário analisar o Eh também com as condições redox do solo (trocas catiônicas, por exemplo), o que não está no escopo deste trabalho.

O Fósforo Total na Área de Estudo 1 apresentou todos os valores abaixo de 0,28 mg/L, que é o valor máximo alcançado em toda a grade amostral e ocorrendo no poço PM03. Para os Fosfatos, o valor máximo alcançado foi de 1,83 mg/L no PM20.

Para o SDT o MVP foi alcançado em 3 coletas, duas no PM01 e uma no PM03A. As águas são classificadas na Classe 2 da Resolução CONAMA nº 396/2008 em 4% dos resultados, sendo os 96% restantes das amostras classificadas como Classe 1.

Para Cloretos, o MVP não foi atingido no período amostral. Para Sulfatos, houve somente uma detecção acima do MVP no poço PM03A com valor de 345,7 mg/L.

Por fim, os poços que mais alteram a qualidade da água na região são os poços PM03 (Nitrato, Nitrogênio Kjeldahl, Nitrogênio Amoniacal) e PM03A (Nitrato, Nitrogênio Kjeldahl, Nitrogênio Amoniacal), seguido pelo poço PM01 (SDT, Sulfatos e pH) e por PM04 (E. Coli).

#### 4.2.2. Área 2

Para Nitrato, houve detecção superior ao MVP de 23,7 mg/L N no poço PMD (Figura 7). Todavia, considerando a média de detecções no poço sem somar o dado acima do MVP, é obtido o resultado de 0,21 mg/L mg/L N. Dessa forma, é considerada a hipótese de que o valor de 23,7 mg/L N seja um erro de laboratório. Nesta mesma data, ocorreram detecções de 1,19 mg/L e 1,17 mg/L nos poços PMA e PMC, respectivamente. Em relação à demais detecções, para o PMC, foram registradas detecções de 3,34 em junho de 2022 e 6,39 em julho de 2023, ambas abaixo do MVP. O enquadramento para Nitratos considerando a Resolução CONAMA nº 396/2008 indica 1,8% de enquadramento Classe 3 e 98,2% de Classe 1, considerando o valor de 23,7 mg/L N de detecção na análise temporal.

Em relação aos demais compostos nitrogenados, nitrito apresentou valor de detecção de 0,91 mg/L, o que é um valor alarmante, pois está quase atingindo o MVP do parâmetro (1 mg/L). Porém, o valor não se repetiu. Observando os resultados do Nitrogênio Kjeldahl Total (NKT) e do Nitrogênio Amoniacal ( $NH_3$ ) juntos, é possível observar que 37% dos dados foram iguais, o que indica resultados superiores para amônia livre em comparação ao nitrogênio orgânico e que, portanto, indica o menos oxidado estado de nitrogênio. Esses 37% dos dados foram detectados nos poços PMD e PME. Este fator é importante para a análise porque demonstra uma entrada mais recente de N na região.

Houve 51,79% dos dados de E. Coli abaixo do limite de quantificação laboratorial. No total, a frequência de não cumprimento do MVP para E. Coli foi de 25, ocorrendo principalmente nos poços PME (7 vezes) e PMD (6 vezes). No caso do Fósforo, os maiores valores foram encontrados no PME e no PMD, com valores de 1,39 mg/L e 1,24 mg/L, respectivamente. É importante destacar que as licenças de operação, tomando como exemplo a Licença da Área de Estudo 1, indicam um valor de referência máximo para efluente de Fósforo de 1 mg/L. No caso dos Fosfatos da Área de Estudo 2, o valor máximo alcançado foi de 11,3 mg/L em PMD.

O MVP para SDT não foi alcançado em nenhuma coleta e as médias gerais detectadas ficaram todas abaixo de 250 mg/L. Os MVPs também não foram atingidos no período amostral para Cloretos e Sulfatos.

O pH é ácido para a região, com valor máximo dado por 6,58 na PMA. Valores baixos de pH não podem ser associados a bacias de infiltração, pois os efluentes possuem pH alcalino ( $> 7$ ). Os poços mais próximos das bacias apresentam pH mais alcalino, condizente com o fluxo das águas subterrâneas. Houve 31 detecções fora do MVP, o que indica 55,4% do total de amostras.



**Figura 7.** Datas e concentrações de Nitrato acima do MVP na Área de estudo 2.

Para CE, as médias variaram entre 372,64  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (PMBA) e 575,18  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (PME), estando presentes nas áreas que também apresentaram pH mais alcalino, como o PME, PMA e PMD.

Considerando Eh, observa-se que a região apresenta condições majoritariamente oxidantes ( $\text{Eh} < 0$ ), sendo o ponto de maiores condições redutoras no PMC. O triângulo formado por PMA, PMD e PME apresenta as condições mais oxidantes da região.

Conclui-se, portanto, que os poços que mais alteraram a qualidade da água na região foram: PMD (Nitrato, Nitrogênio Amoniacal, Fósforo e Fosfato), PME (E. Coli, Fósforo, Fosfato, Nitrogênio Amoniacal), seguido do PMC (Sulfatos e SDT) e PMBA (NKT e Nitrogênio Amoniacal).

PMD e PME estão localizados em áreas que indicam o pH mais alcalino da região, o que pode indicar a presença de efluentes, uma vez que a área possui pH ácido e os efluentes estão associados ao pH alcalino. A presença de compostos nitrogenados e E. Coli são indicadores ainda mais fortes da presença de efluentes. O poço PMD fica na área inundada.

O PMBA apresentou alguns valores de alerta para compostos nitrogenados, pois são indicadores de contaminação por efluentes. Juntamente com a PME apresentou algumas detecções para E. Coli. Além disso, sua localização está associada a um pH mais ácido. O PMBA está localizado próximo à borda de duas bacias de infiltração.

### 4.3. Modelo Hidrogeológico Conceitual

Os modelos hidrogeológicos conceituais para as Áreas de estudo 1 e 2 podem ser visto na Figura 7 e Figura 8, respectivamente:

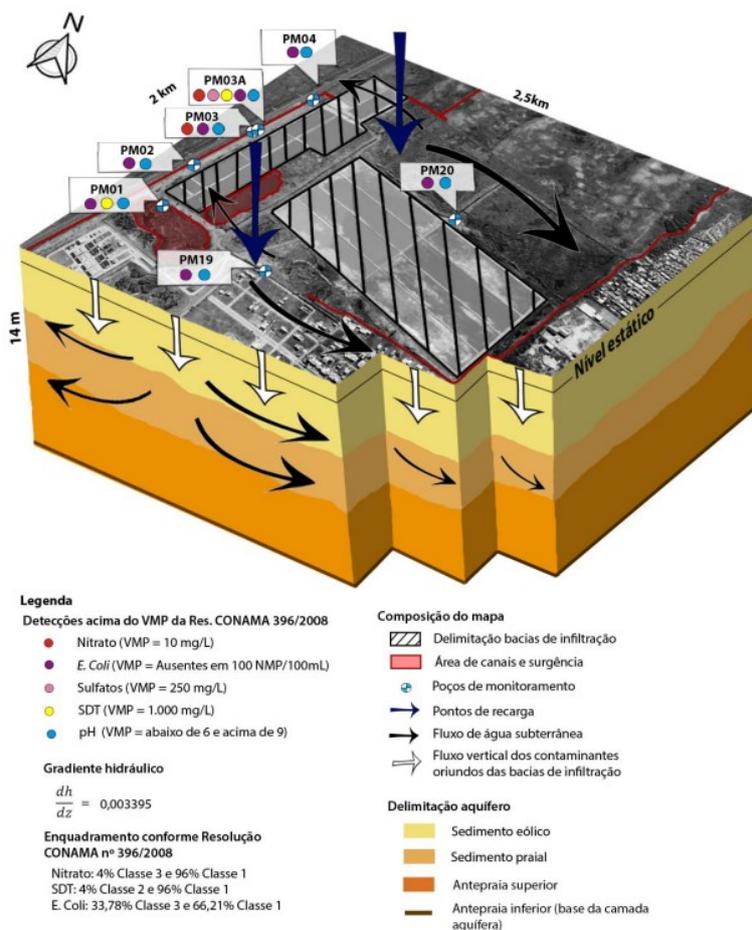


Figura 8. Modelo Hidrogeológico Conceitual da Área de estudo 1.

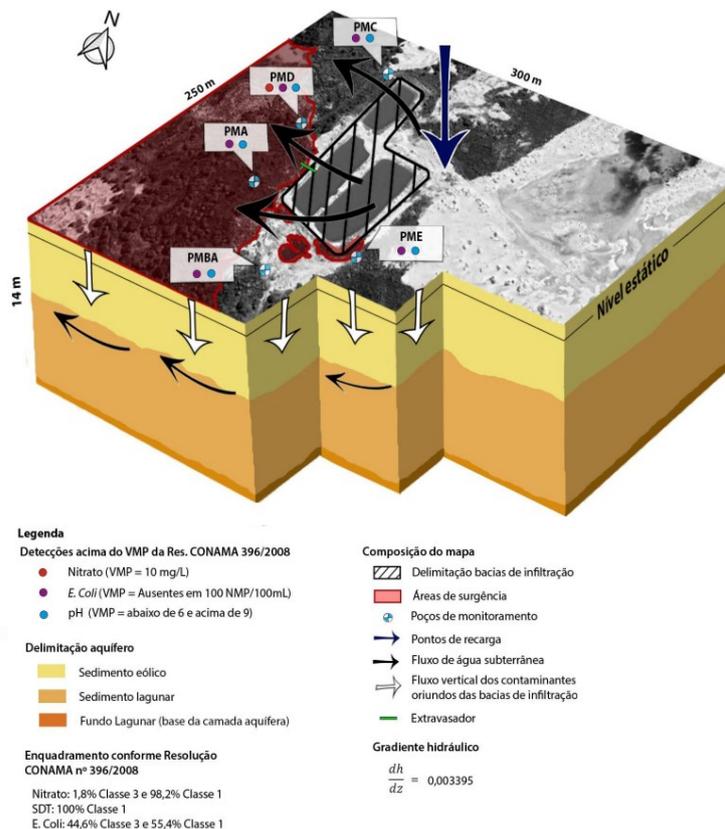


Figura 9. Modelo Hidrogeológico Conceitual da Área de estudo 2.

#### 4.4. Análise, comparação e discussão das áreas de estudo

É perceptível que existem diferenças físicas entre as duas bacias, como, por exemplo, o tamanho de ambas – 1 ha para a Área de Estudo 2 e 37 ha para a Área de Estudo 1. Contudo, é importante enfatizar as individualidades operacionais que foram encontrados nas duas áreas. Para a Área de Estudo 1 estão os canais que circundam as bacias e que influenciam os resultados hidroquímicos encontrados nos poços. Os poços, devido à elevação dos níveis de água nas bacias, acabam recebendo os efluentes circundantes nos canais, o que altera a qualidade das águas subterrâneas. Quanto à Área de Estudo 2, não existem canais. No entanto, há picos de água nas bordas das bacias. Com isso, criou-se uma área inundada pelo efluente, bem como acúmulos (“lagoas”) de efluentes gerados pela onda.

Quanto à caracterização hidrogeológica entre os dois sistemas, é possível observar que ambas as regiões possuem camadas de sedimentos com aquíferos granulares não confinados. Em ambas as áreas, os valores de profundidade do nível da água foram inferiores a 1,5m nos poços de monitoramento, indicando zona vadosa rasa, o que pode afetar a eficiência do tratamento de efluentes.

Os aquíferos de ambas as áreas apresentaram baixo gradiente hidráulico, com a Área de Estudo 1 apresentando 0,00283 e a Área de Estudo 2 apresentando 0,00793. Os baixos gradientes, juntamente com as baixas condutividades hidráulicas, resultaram em baixas velocidades de fluxo de água: velocidade aparente  $V_q$  de  $1,05 \times 10^{-7}$  m/s (0,879 cm/dia) e velocidade intersticial  $V_i$  de  $3,16 \times 10^{-7}$  m/s (2,65 cm/dia) para a Área de Estudo 1 e velocidade aparente  $V_q$  de  $5,05 \times 10^{-7}$  m/s (4,35 cm/dia) velocidade intersticial  $V_i$  de  $1,34 \times 10^{-6}$  m/s (11,64 cm/dia) para a Área de Estudo 2. Um resumo da análise hidrogeológica pode ser observada na Tabela 3:

**Tabela 3** – Resumo das características hidrogeológicas de ambas as áreas de estudo

<b>Características hidrogeológicas</b>	<b>Área 1</b>	<b>Área 2</b>
Porosidade total	25% - 36,83%	38,72 e 39,58%,
Porosidade efetiva	23,81% - 33,08%	35,46 e 37,37%.
Condutividade hidráulica	$3,7 \times 10^{-5}$ m/s	$6,35 \times 10^{-5}$ m/s
Profundidade mínima nível de água	0,4m (PM19)	0,0m (PZ03, PZ04, PZ05)
Profundidade máxima nível de água	2,45 m (PZ04)	1,30m (PZ02)
Velocidade aparente	$1,25 \times 10^{-7}$ m/s (1,05 cm/dia)	$3,30 \times 10^{-7}$ m/s (2,85 cm/dia)
Velocidade intersticial	$3,79 \times 10^{-7}$ m/s (3,28 cm/dia)	$8,84 \times 10^{-7}$ m/s (7,63 cm/dia)

Nas análises hidroquímicas encontramos algumas semelhanças: áreas com pHs mais ácidos e regiões predominantemente oxidantes ( $E_h < 0$ ). Além disso, quanto mais próximas das bacias, mais alcalinas são as amostras. Altas concentrações de NKT podem indicar entrada recente de efluentes no aquífero, especialmente quando associadas a resultados de  $NH_3$ .

Os resultados da Área de Estudo 1 apresentaram menor conformidade com o MVP da Resolução CONAMA nº 396/2008 quando comparados à Área de Estudo 2. Foram 5 compostos com detecção (Nitrato – 3 detecções, E. Coli – 24 detecções, SDT – 3 detecções, Sulfatos – 1 detecção e pH – 62 detecções), enquanto na Área de Estudo 2 houve 3 compostos com detecção (Nitrato – 1 detecção, E. Coli – 25 detecções e pH – 33 detecções).

A Área de Estudo 1 apresentou a seguinte classificação conforme Resolução CONAMA nº 396/2008: Nitrato: 4% Classe 3 e 96% Classe 1; SDT: 4% Classe 2 e 96% Classe 1 e E. Coli: 33,78% Classe 3 e 66,21% Classe 1. A Área de Estudo 2 apresentou Nitrato: 1,8% Classe 3 e 98,2% Classe 1, SDT: 100% Classe 1 e E Coli: 44,6% Classe 3 e 55,4% Classe 1.

## 5. CONCLUSÃO

É possível observar que houve alteração na qualidade das águas subterrâneas para ambas as áreas de estudo. Apesar de apresentarem diferenças em relação à área e população atendida, as duas bacias de infiltração apresentaram falta de eficiência no tratamento de efluentes. Ainda para a Área de Estudo 1, a identificação e mapeamento dos canais ao redor das bacias influenciam a qualidade da água nos poços.

Devido à elevação dos níveis de água nas bacias, os canais acabam tendo papel na captação do fluxo subterrâneo, comprometendo a eficiência do tratamento das bacias.

**Tabela 4 – Comparativo final Área de estudo 1 e Área de estudo 2**

Indicadores	Área de estudo 1	Área de estudo 2
População município atendido	55.009 pessoas (IBGE, 2021)	16.897 pessoas (IBGE, 2021)
Área de ocupação (ha)	37 hectares	1 hectare
Proximidade da civilização (m)	Aprox. 30 m	Aprox. 500 m
Tipo de aquífero	Granular livre heterogêneo	Granular livre heterogêneo
Maior porosidade efetiva	33,08%	37,37%
Condutividade hidráulica (cm/s)	3,7x10 <sup>-3</sup> cm/s	6,35x10 <sup>-3</sup> cm/s
NA médio (m)	1,22 m	0,55 m
Gradiente hidráulico	0,003395	0,0052
Velocidade Aparente (Vq) e Intersticial (Vi)	Vq = 1,25x10 <sup>-7</sup> m/s (1,05 cm/dia) Vi = 3,79x10 <sup>-7</sup> m/s (3,28 cm/dia).	Vq = 3,30x10 <sup>-7</sup> m/s (2,85 cm/dia) Vi = 8,84x10 <sup>-7</sup> m/s (7,63 cm/dia).
Frequência de não atendimento aos VMPs da Resolução CONAMA nº 396/2008 e Resolução CONAMA nº 420/2009 (Nitrato)	Nitrato: 3 (4% das amostras) Nitrito: 0 E. Coli: 24 (33,78% amostras) SDT: 3 (4% das amostras) Cloretos: 0 Sulfatos: 1 (1,4% das amostras) pH: 62 (83,8% das amostras)	Nitrato: 1 (1,8% das amostras) Nitrito: 0 E. Coli: 25 (44,6% amostras) SDT: 0 Cloretos: 0 Sulfatos: 0 pH: 31 (55,4% das amostras).
Classificação das águas de acordo com Resolução CONAMA nº 396/2008	Nitrato: 4% Classe 3 e 96% Classe 1 SDT: 4% Classe 2 e 96% Classe 1 E. Coli: 33,78% Classe 3 e 66,21% Classe 1.	Nitrato: 2% Classe 3 e 98% Classe 1. SDT: 100% Classe 1 E. Coli: 44,6% Classe 3 e 55,4% Classe 1.
Individualidades operacionais	Canais de circulação das bacias de infiltração; Poços com problemas construtivos	Áreas de surgência e extravasador; Sem poço branco

Em relação à caracterização hidrogeológica para a áreas de estudo, os valores de profundidade do nível da água foram inferiores a 1,5m nos poços de monitoramento, indicando uma espessura de zona vadosa mais fina para ambas as áreas. A zona vadosa serve, num sistema de bacia de infiltração, como controlador da qualidade da água, realizando os processos biogeoquímicos necessários à filtragem do efluente. Portanto, uma profundidade inferior a 1,5 metros é uma indicação de que a zona vadosa não será capaz de realizar os processos de purificação necessários.

Para ambas as áreas analisadas, foram encontrados baixos gradientes hidráulicos. Consequentemente, as águas subterrâneas não apresentam velocidades elevadas, atingindo apenas velocidades em níveis baixos e muito baixos. Estas baixas velocidades acarretam uma dificuldade muito grande de dispersão do efluente pelo fluxo das águas subterrâneas, provocando aumento dos níveis de água e gerando surtos nas áreas do entorno das bacias. Para a Área de Estudo 2, por exemplo, a onda pode causar rompimento de taludes, com transbordamento de efluentes.

As áreas demonstram que fatores como profundidade da zona vadosa, gradiente hidráulico, velocidade de fluxo das águas subterrâneas, permeabilidade do solo e profundidade das águas subterrâneas são os fatores mais importantes a serem definidos na escolha de áreas para tecnologias como Infiltração Rápida, especialmente em regiões costeiras, onde a hidrogeologia é composta por aquíferos granulares e muitas vezes não confinados, com maior risco de contaminação. Independentemente da área que o sistema irá ocupar, é fundamental que esses fatores sejam cuidadosamente avaliados para evitar o surgimento de contaminantes de efluentes que possam colocar a população em risco.

Por fim, indica-se também que sejam realizadas manutenções nos sistemas, uma vez que problemas operacionais também podem afetar a qualidade das águas subterrâneas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADOBE CREATIVE TEAM. *Adobe Photoshop CS6 Classroom in a Book*. 1 ed. [S.l.]: Adobe Press, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780240526126>
- ASANO, T. et al. *Water reuse: issues, technologies, and applications*. New York: McGraw-Hill Education, 2007.
- BORGES, V. M.; ATHAYDE, G. B.; REGINATO, P. A. R. Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do sistema aquífero Serra Geral no Estado do Paraná – Brasil. *Águas Subterrâneas*, v. 31, n. 4, p. 327–337, 2017. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v31i4.28857>
- BRAGA, F. S. *Disposição de esgotos sanitários por infiltração rápida, sob condições de campo e de laboratório, em solo arenoso de região litorânea*. 1998. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos. DOI: <https://doi.org/10.11606/t.18.1998.tde-20062024-114459>
- CRITES, R. W.; TCHOBANOGLIOUS, G. *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. New York: McGraw-Hill, 1998.
- HASEÑACK, H.; FERRARO, W. L. Considerações sobre o clima da região de Tramandaí, RS. *Pesquisas*, v. 22, p. 53–70, 1989. DOI: <https://doi.org/10.22456/1807-9806.21456>
- HERNANDEZ, P. G. L. et al. Efeito da interpolação de dados hidrogeológicos em aquíferos sedimentares: estudo de caso no estado do Paraná. *Águas Subterrâneas*, v. 35, n. 1, p. 1–11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v35i1.29911>
- HESPANHOL, I. et al. Potencial de reúso de água no Brasil: agricultura, indústria, municípios, recarga de aquíferos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 7, n. 4, p. 75–95, 2002. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v7n4.p75-95>
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo Brasileiro de 2010*. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. DOI: <https://doi.org/10.17143/ciaed/xxiilciaed.2017.00322>
- KUCK, G. I.; PORTZ, L.; GRUBER, N. L. S. Ocupação da orla e os impactos socioambientais no município de Cidreira, Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 8, n. 4, p. 1028–1040, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20150051>
- MACHADO, J. L. F.; FREITAS, M. A. de. *Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul*. v 1. Rio de Janeiro: CPRM, 2005.
- MORAES, A. C. R. *Os impactos da política urbana sobre a zona costeira*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, Secretaria de Coordenação dos Assuntos do Meio Ambiente, MMA, 1995. 33 p. DOI: <https://doi.org/10.4322/978-85-455202-0-7-10>
- SILVA, F. et al. Caracterização de solos residuais para infiltração de efluente de estação de tratamento de esgoto. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22, p. 95–102, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016141677>
- STROHAECKER, T. M. *A urbanização no Litoral Norte do Estado do Rio Grande do Sul: contribuição para a gestão urbana ambiental do Município de Capão da Canoa*. 2007. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v34i3.29883>
- TOMAZELLI, L. J.; VILLWOCK, J. A. O cenozóico costeiro do Rio Grande do Sul. In: TOMAZELLI, L. J.; VILLWOCK, J. A. *Geologia do Rio Grande do Sul*, v. 375, 2000. DOI: <https://doi.org/10.22456/1807-9806.21358>
- TROIAN, G. C.; GOFFERMANN, M.; FREITAS, M. A. Monitoramento quali-quantitativo do aquífero costeiro no Litoral Norte do Estado do Rio Grande do Sul. *Águas Subterrâneas*, [S. l.], 2014. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v34i3.29883>
- TROIAN, G. C.; REGINATO, P. A. R.; MARQUEZAN, R. G.; KIRCHHEIM, R. Modelo conceitual hidroestratigráfico do sistema aquífero costeiro no litoral norte do Estado do Rio Grande do Sul. *Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 3, p. 264–274, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v34i3.29883>
- VILLWOCK, J. A.; TOMAZELLI, L. J. Geologia costeira do Rio Grande do sul. *Notas Técnicas*, v. 8, p. 1–45, 1995. DOI: <https://doi.org/10.22456/1807-9806.21358>
- ZANATTA, L. C. Avaliação da eficiência da infiltração de efluentes nas dunas do aquífero Campeche, Florianópolis, S.C. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 18., 2011. São Paulo, 2011. DOI: <https://doi.org/10.11606/d.44.1995.tde-10042015-132801>